

【補助事業概要の広報資料】

補助事業番号 26-121
補助事業名 平成26年度 半導体ナノ細線の新創成と機械量センサ応用評価
補助事業
補助事業者名 国立大学法人神戸大学工学研究科 教授 磯野吉正

1 研究の概要

超小型、超低消費電力でかつ、高感度なMEMS機械量センサを実現することを目的に、単結晶Siナノ細線の結晶成長技術の確立と、MEMSデバイスを援用した同ナノ細線の応力誘起電気伝導特性評価を実施した。Siナノ細線結晶成長には、金ナノ粒子触媒を用いたVLS (Vapor-Liquid-Solid) 法を採用し、結晶性の高いSiナノ細線のボトムアップ形成を実現した。また、静電駆動型アクチュエータ、平行板型静電容量センサ、およびカンチレバー型変位拡大校正機構を集積したナノ細線引張り試験用MEMSデバイスを開発し、Siナノ細線単体での応力誘起電気伝導特性を解明した。その結果、バルクSiのゲージ率に比べて巨大なゲージ率を示すことが明らかとなった。

2 研究の目的と背景

MEMS機械量センサの開発において、更なる低消費電力化・小型化・高機能化の要求がますます強くなってきている。しかしながら、センサの極小化に伴って検出感度が低下してしまうという本質的課題が存在している。例えば、加速度センサについては、センサの極小化に伴って、加速度を検知するための質量体体積が減少するため、センサ自体に作用する力学量が減少する。この結果、検出感度も低下する。この機械量センサの本質的課題を解決する方法として、一次元ナノ半導体材料の検出素子への利用が考えられる。とくに、単結晶シリコン(Si)ナノ細線は、第一原理計算により1%歪みの下でそれらのバンド構造が大きく変化することが既に予測されており、歪み変化に伴う電気伝導特性の大きな変化が期待できる。しかしながら、これら一次元ナノ細線という微小性ゆえにナノ細線単体での応力誘起電気伝導特性を評価した例は殆どなく、デバイス設計に必要なナノ細線の応力誘起電気伝導特性が未解明のままである。

本研究は、結晶性の高い一次元Siナノ細線のボトムアップ結晶成長技術の確立と、MEMSデバイスを援用した同ナノ細線の応力誘起電気伝導特性評価を同時に実施することにより、高感度極小MEMS機械量センサの早期実現を目指すものである。

3 研究内容

① Siナノ細線の高効率結晶成長技術の確立

<http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-isonolab/>

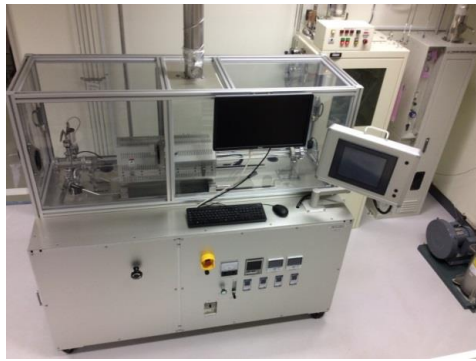


図1 Siナノ細線結晶成長用VLS-CVD装置

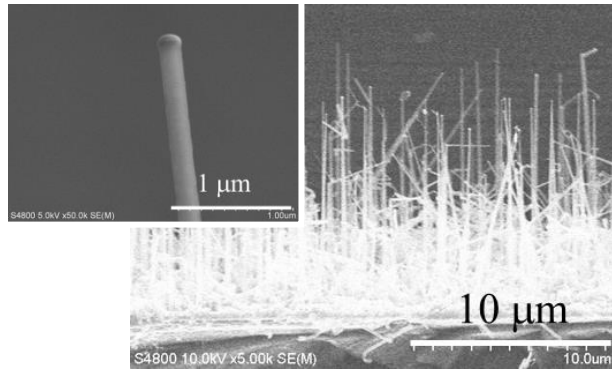


図2 <111>方向に主として配向成長したSiナノ細線

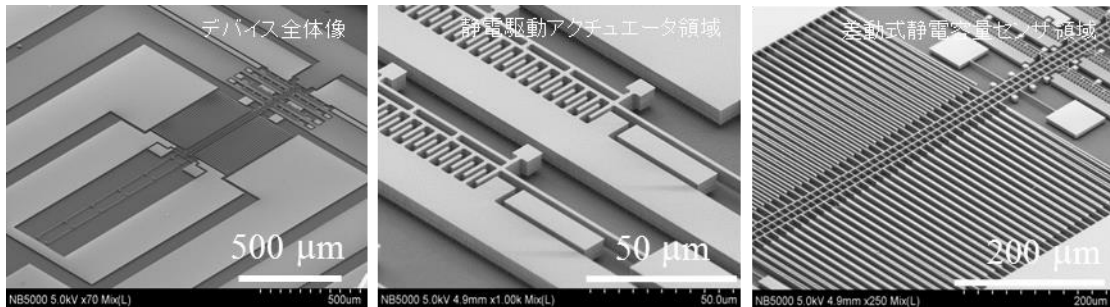


図3 ナノ細線引張り試験用MEMSデバイス

図1のVLS-CVD装置を用いて、Siナノ細線結晶成長プロセス実験を実施した。とくに、本研究では、単結晶Si (111) 面上および(112) 面上にて配向制御しながらSiナノ細線を成長させることに成功している。具体的には、ガス流量、圧力、および温度を変化させながらSiナノ細線結晶成長の合理的条件を抽出した結果、 SiH_4 ガス100sccm一定の下で、<111>方向Siナノ細線成長には圧力600Pa、温度550°Cでのプロセス条件が(図2参照)、また、<112>方向Siナノ細線成長には圧力1500Pa、温度530°Cのそれが適していることが実験的に明らかになった。

② MEMSデバイスの設計・開発

Siナノ細線のセンサ機能評価を行うためのナノ細線引張り試験用MEMSデバイスの構造設計、プロセス設計、および試作を行った(図3参照)。ここでは、静電アクチュエータと差動式静電容量センサとが1つのチップ上に集積した構造としている。また、変位計測値の校正のため、機械式変位増幅機構も併せて同チップ上に集積している。試作したMEMSデバイスの駆動評価実験では、静電駆動アクチュエータに電圧印加しながら機械式変位増幅機構部での変位計測を実施したところ、設計想定値とほぼ一致した変位が確認された。

一方、MEMSデバイス上の試験片部側壁にのみSiナノ細線単体を集積させるための技術を確立した。研究当初の計画では、Siナノ細線成長のために必要な触媒金ナノ粒子配置方法として、金ナノ粒子含有コロイド溶液を用いた誘電泳動プロセスに採用し、MEMSデバイス上の試験片部側壁への金ナノ粒子固定化技術を確立した。その結果、所望の側壁に金ナノ粒子を固定化することができた。さらに、引き続いて実施した結晶成長プロセスにおいて、Siナノ細線単体を試験片部に架橋成長することにも併せて成功した。

③ MEMSデバイスによるSiナノ細線単体での応力誘起電子伝導特性評価

Siナノ細線単体を架橋したMEMSデバイスを用いて、 $\langle 111 \rangle$ 方向、 $\langle 112 \rangle$ 方向Siナノ細線の応力誘起電子伝導特性を実験的に解明することで、同特性に明確な方位依存性があることを明らかにした。具体的には、 $\langle 111 \rangle$ 方向、 $\langle 112 \rangle$ 方向Siナノ細線ともに、歪み増加に伴って電気抵抗変化率は減少する。例えば、歪み3%での電気抵抗変化率に注目すると、 $\langle 111 \rangle$ 方向Siナノ細線において-80%、 $\langle 112 \rangle$ 方向Siナノ細線では-35%を示した（図4参照）。これらを電気伝導性の観点から見ると、 $\langle 111 \rangle$ 方向Siナノ細線では電気伝導性が5倍に、 $\langle 112 \rangle$ 方向Siナノ細線のそれは1.53倍になることと同等である。すなわち、Siナノ細線に機械的な歪みを誘起することで、電子のモビリティが増大することが認められる。一方、同図において電気抵抗変化率の傾きが大きい、歪み0.1~0.2%でのゲージ率を概算すると、 $\langle 111 \rangle$ 方向、 $\langle 112 \rangle$ 方向Siナノ細線のそれらは、 $-170.7 @ 0.2\%$ および $-128.9 @ 0.1\%$ となることがわかった。これらのゲージ率は、不純物拡散濃度にも依存するものの、一般的に知られている $\langle 111 \rangle$ 、 $\langle 112 \rangle$ 方向のn型バルクSiのゲージ率-14および-53より大きな値を示した。

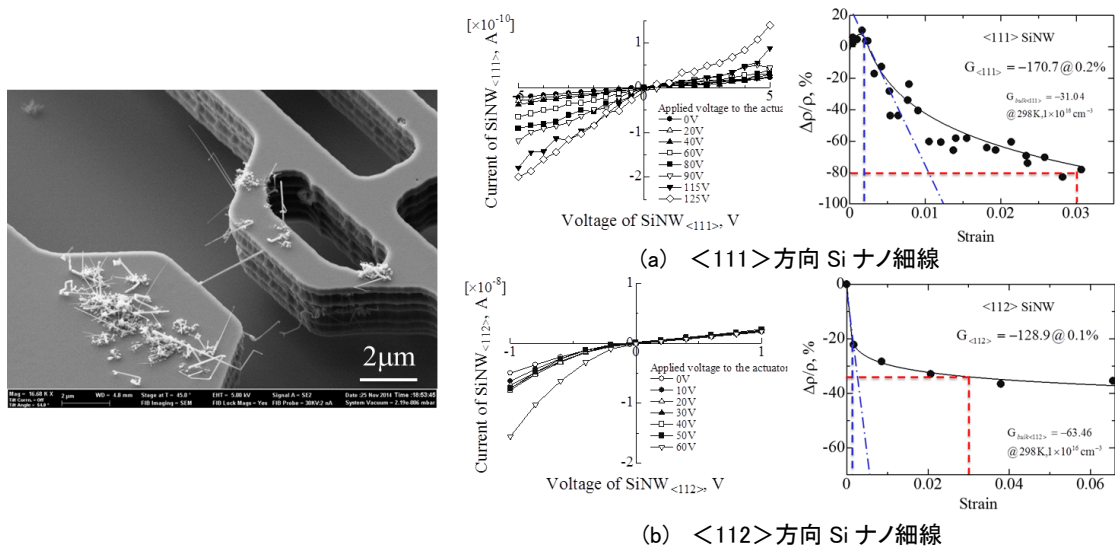


図4 VLS成長Siナノ細線の応力誘起電気伝導変化の結晶方位依存性

4 本研究が実社会にどう活かされるか一展望

機械量センサ素子として、Siナノ細線を利用することが有効であることが定量的に示された。これにより、次世代センサネットワーク社会への飛躍的な発展を図るための、低消費電力であり、かつ極小、高感度な機械量センサデバイスが実現できる。例えば、機械量センサの極小化に伴って衣類への搭載を簡易化でき、モバイル型人体情報モニタリングシステムの実現が期待できる。また、無線デバイスと融合しながら道路や地中へ分散することで、環境モニタリングシステムの構築も期待される。このように、極小高感度機械量センサが組み合わせられた各種モニタリングシステムが実現されれば、安全・安心・省エネルギーな社会に寄与することができる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

これまでの研究で培ってきたMEMSデバイス設計開発技術と極微細加工技術の知見に基づき研究を進めるとともに、従来の技術に加えて新たにSiナノ細線結晶成長技術を確立することができた。また、本研究では、最終的な高感度極小MEMS機械量センサの実現のために必須である、Siナノ細線の応力誘起電気伝導特性を定量的に得ることができた。このため、今後の極小機械量センサデバイスの開発研究の飛躍的な発展が期待できる。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

【学会発表】

1) “VLS 成長シリコンナノワイヤの歪み誘起電気伝導特性の結晶方位依存性”, 仲田 進哉, 北田 勇馬, Stefan Wagesreither, Alois Lugstein, 菅野 公二, 磯野 吉正, 平成27年電気学会センサ・マイクロマシン部門大会第32回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 朱鷺メッセ, 新潟, 2015年10月28-30日, 29pm2-B-2 .

2) “Crystal Orientation Dependence of Piezoresistivity for VLS-Grown Single Crystal Silicon Nanowires”, Shinya Nakata, Yuma Kitada, Stefan Wagesreither, Alois Lugstein, Koji Sugano, Yoshitada Isono, The 11th Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE-NEMS 2016), Sendai, Japan, Apr. 17-20, 2016, A1L-C-3 (2p).

7 補助事業に係る成果物

(1) 補助事業により作成したもの

上記の「6 本研究にかかわる知財・発表論文等」に記載した学会発表 1) の講演論文

(2) (1) 以外で当事業において作成したもの

該当なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 神戸大学（コウベダイガク）

住 所： 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1

申 請 者： 教授 磯野吉正（イソノヨシタダ）

担 当 部 署： 工学研究科機械工学専攻

（コウガクケンキュウカキカイコウガクセンコウ）

E-mail： isono@mech.kobe-u.ac.jp

URL： <http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-isonolab/>